Spanningsreferenties

Moderne elektronische schakelingen vragen vaak om onderdelen die voor een nauwkeurige en stabiele referentiespanning zorgen. Gelukkig zijn dergelijke onderdelen ontwikkeld onder de verzamelnaam spanningsreferenties.

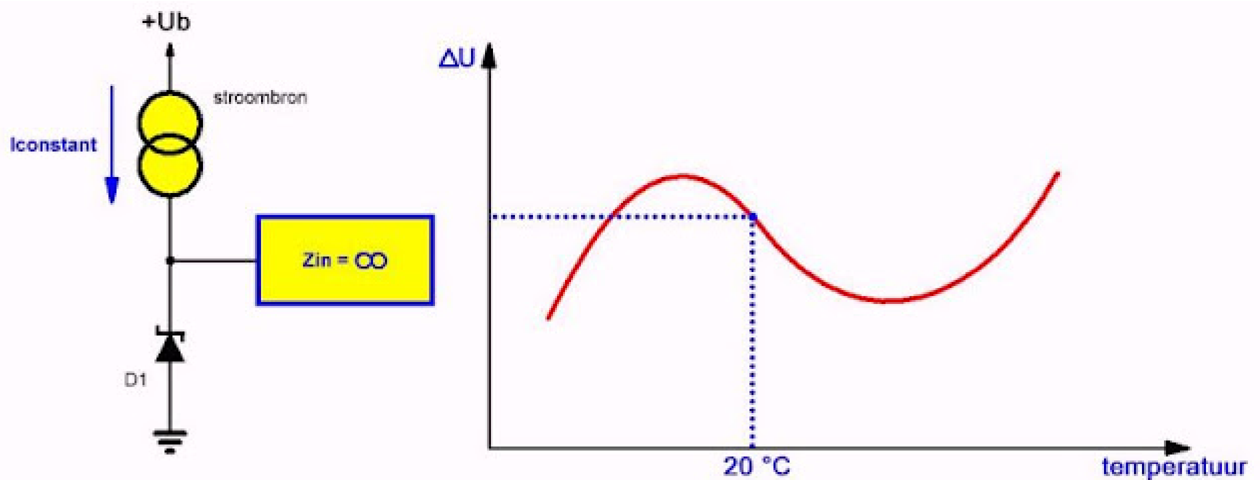
Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 10-12-2017

Wat is er mis met de zenerdiode?

De zenerdiode schiet tekort
Dat is de eerste vraag die u zich waarschijnlijk stelt. Die onderdelen bestaan immers al tientallen jaren en hebben al die tijd trouw stabiele spanningen gegenereerd die nog steeds de basis vormen van miljoenen gestabiliseerde voedingen. Zolang u geen al te hoge eisen stelt aan de nauwkeurigheid, de tolerantie en de stabiliteit van de referentiespanning is er inderdaad nog steeds niets op tegen om een zenerdiode in te zetten. Maar moderne, twaalf of meer bit brede zeer nauwkeurige DAC's en ADC's stellen andere, veel hogere eisen dan een regelbare voeding!
Om duidelijk te maken wat er mankeert aan de zenerdiode dient het volgende voorbeeld. Zelfs de meest stabiele zenerdiode heeft over het temperatuurbereik van +10 °C tot +30 °C een verloop van ongeveer 0,30 % op de zenerspanning. Stel nu dat u dit onderdeel gebruikt als referentie in een twaalf bit brede A/D-omzetter. Een dergelijke schakeling zet de analoge ingangsspanning om in 4.096 verschillende digitale codes. Elke van deze codes komt dus overeen met 0,024 % van het volledige bereik van de omzetter. Het zal nu wel duidelijk zijn dat het verloop van 0,30 % op de referentiespanning de zeer grote nauwkeurigheid van deze omzetter volledig teniet doet.

De temperatuurscoëfficiënt van een zenerdiode
Een van de eerste bezwaren tegen zenerdioden is dus hun grote temperatuurscoëfficiënt. De meeste families hebben een temperatuurscoëfficiënt die kan variëren van -2,5 mV/°C tot +20,5 mV/°C. Een en ander is afhankelijk van de waarde van de zenerspanning, want lage spanningen hebben een negatieve temperatuurscoëfficiënt, hoge spanningen een positieve. Bij de meeste series ligt het overgangspunt van negatief naar positief tussen 5 V en 6 V. Zo heeft een 5,1 V zenerdiode meestal de kleinste temperatuurscoëfficiënt, namelijk -0,8 mV/°C.

Het S-vormige verloop van de temperatuurscoëfficiënt
Een tweede groot nadeel van zenerdioden is het typische S-vormige verloop van de temperatuurscoëfficiënt, zie onderstaande figuur. In de grafiek is het verloop van de temperatuurscoëfficiënt uitgezet in functie van de temperatuur van de zenerdiode. Hieruit blijkt dat deze eerst stijgt, dan daalt en bij hoge temperaturen weer stijgt. De temperatuurscoëfficiënt wisselt dus twee maal van polariteit. Deze S-vormige curve heeft als nadeel dat het niet mogelijk is een eenvoudige compensatieschakeling te ontwerpen waarmee u de temperatuurscoëfficiënt kunt compenseren.



Het S-vormige verloop van de temperatuurscoëfficiënt van een zenerdiode.
(© 2017 Jos Verstraten)

Een zenerdiode genereert per definitie ruis
Een derde probleem is de vrij hoge ruisspanning die over een zenerdiode ontstaat. Zenerdioden worden immers in sper gepolariseerd. Nu hebben al dit soort onderdelen, als gevolg van de thermische bewegingen in de moleculen van het halfgeleidende kristal, een vrij hoge eigen ruis. Deze zogenaamde *'brownse bewegingen'* zorgen ervoor dat op volledig willekeurige momenten elektronen door de junctie-barrière breken en een kleine sprong op de uitgangsspanning veroorzaken. Dit statistische verloop uit zich in een hoge ruisspanning, die als het ware op de gelijkspanning op de uitgang gesuperponeerd is. Deze ruisspanning beïnvloedt de momentele waarde van de zenerspanning en kan bij nauwkeurige toepassingen problemen veroorzaken.

De tolerantie van zenerdioden
Een vierde bezwaar van zenerdioden is dat zij een tamelijk grote tolerantie hebben. Als u tien zenerdioden met hetzelfde typenummer koopt en deze voedt met een identieke stroom zult u constateren dat de zenerspanning wel 20 % van exemplaar tot exemplaar kan afwijken.

Besluit
Al met al redenen genoeg dus om naar betere en nauwkeurigere alternatieven te zoeken. En dat heeft de halfgeleider-industrie dan ook driftig gedaan!

De principes van spanningsreferenties

Honderden spanningsreferenties werken volgens vier principes
Als u de moeite neemt om de sites van de tien grootste IC-fabrikanten door te ploegen zult u zonder al te veel inspanning meer dan honderd verschillende typen spanningsreferenties bij elkaar sprokkelen. Daar zijn heel eenvoudige tweepootjes bij, die u in feite kunt beschouwen als verbeterde zenerdioden, maar ook heel ingewikkelde schakelingen in DIL-16, die een tot twee decimalen na de komma nauwkeurige uitgangsspanningen genereren. Toch werken al deze schakelingen volgens slechts vier principes. Voor een goed begrip van de materie is het noodzakelijk eerst deze principes in het kort te beschrijven.

De vier basisprincipes
De vier werkingsprincipes van spanningsreferenties zijn:

- Speciale zogenaamde *'sub-surface'* zenerdioden die als belangrijkste kenmerken een zeer lage eigen ruis en een zeer goede stabiliteit op lange termijn hebben.
- Temperatuur gecompenseerde referenties, die werken met een invers gepolariseerde basis/emitter-overgang van een silicium transistor en waarbij hulpschakelingen de lineaire temperatuurscoëfficiënt van deze overgang compenseren.

- Bandgap referenties, waarbij de spanning wordt bepaald door de fysische eigenschappen van het silicium van een halfgeleider.
- Thermostatisch geregelde referenties, waarbij de chip op een constante temperatuur wordt gehouden en bijgevolg een spanning wordt gegenereerd die uiterst stabiel is.

De sub-surface referenties

Bij de sub-surface referentie wordt gebruik gemaakt van de invers gepolariseerde basis/emitter-overgang van een silicium transistor. Deze zal doorslaan bij een spanning van ongeveer 6,2 V, zodat de overgang als een soort zenerdiode gaat werken, onder voorwaarde dat u de stroom begrenst door een weerstand in serie op te nemen. Bij normale Si-transistoren ligt de basis/emitter-overgang aan het oppervlak van de chip. De doorslag zal dus ook aan dit oppervlak optreden met als gevolg dat het doorslagproces verstoord wordt door ingewikkelde fysische oppervlakteprocessen, die op korte termijn ruis en op lange termijn instabiliteit tot resultaat hebben. Als u echter de basis/emitter-overgang niet aan het oppervlak legt maar in het chipmateriaal, dan kan er geen sprake zijn van fysische oppervlakteverschijnselen, zodat ruis en instabiliteit geminimaliseerd worden.
In onderstaande figuur is de samenstelling van een dergelijke sub-surface referentie vergeleken met deze van een normale zenerdiode. In het silicium materiaal wordt eerst een vrij smalle, maar diepe P+ zone aangebracht. Rond deze laag wordt de standaard basis-diffusie P- gelegd. Nadien wordt de N+ diffusie van de emitter over de P+ diffusie gelegd. Op deze manier wordt de basis/emitter-overgang verborgen in het kristal en heeft men geen last van oppervlakteverschijnselen. Bij het aansluiten van de basis/emitter-overgang op een grote inverse spanning zal deze overgang doorslaan op de plaats waar de doping het grootst is. Dat is op de plaats waar de P+ en N+ zones elkaar raken.



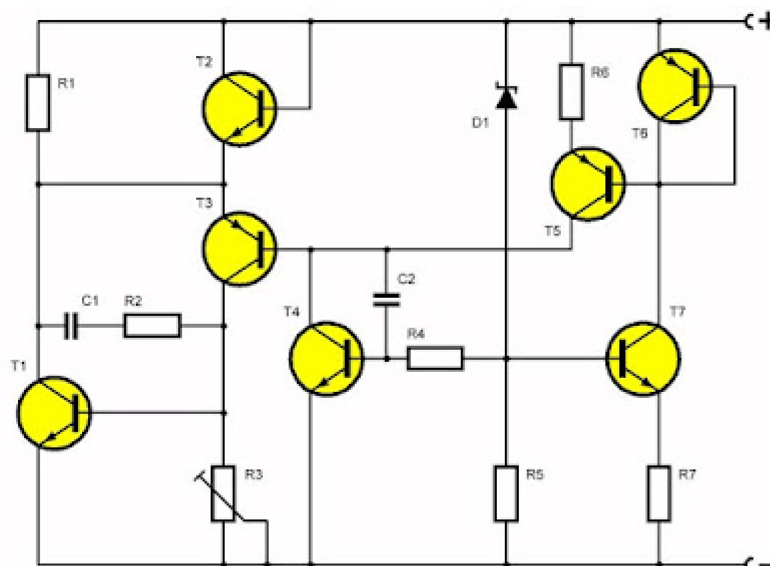
Schematische doorsnede door een sub-surface diode en een gewone zenerdiode. (© 2017 Jos Verstraten)

De doorslagspanning van dit type van spanningsreferenties bedraagt ongeveer 6,3 V, een gunstige waarde omdat u in de praktijk referentiespanningen van 5 V of 10 V nodig hebt. Deze dioden hebben een zeer lage temperatuurdrift, in de datasheets kunt u waarden van slechts 1 ppm/°C tot 2 ppm/°C terug vinden. 'ppm' staat voor *'parts per million'*, delen per miljoen. 1 ppm/°C wil dus zeggen dat de spanning met slechts 1/1.000.000 per graad celsius varieert.
Zij hebben bovendien een zeer lage eigen ruis, namelijk gemiddeld 100 nV/Hz^{-1}. Nadeel is wel dat u er een stroom van 2 mA tot 5 mA doorheen moet jagen. Voor batterij- en accu-gevoede apparatuur kan dat een probleem zijn.

De temperatuur gecompenseerde referenties

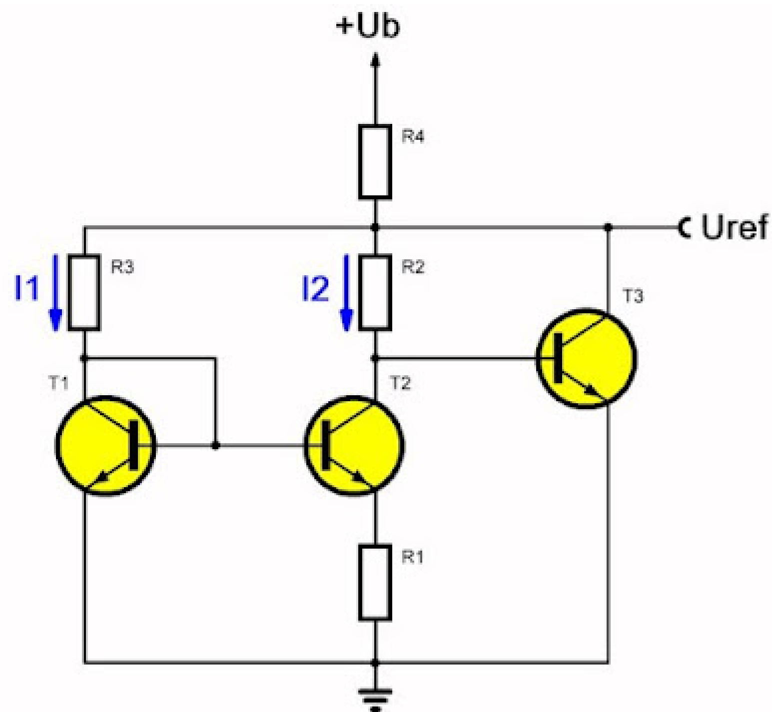
Het principe van een temperatuur gecompenseerde spanningsreferentie is getekend in onderstaande figuur. De diode D1, een sub-surface diode, wordt via een serieweerstand R5 aangesloten op de voedingsspanning. De stroom die door deze weerstand vloeit is onder andere afhankelijk van de spanning die over de diode valt. Deze stroom wekt over de weerstand een spanning op die wordt gebruikt voor het instellen van de transistor T7. Deze transistor stuurt de darlingtontrap T5/T6. De grootte van de stroom die door de collector van T6 geleverd wordt, zal afhankelijk zijn van de spanning over de diode D1. Deze stroom wordt opgenomen door de transistor T4. De basis/emitter-overgang van deze halfgeleider is geschakeld over de serieweerstand R5 van de sub-surface diode. De basis/emitter-spanning van T4 is afhankelijk van de waarde van de collectorstroom. Deze basis/emitter-spanning staat over de serieweerstand en afwijkingen van de referentiespanning, veroorzaakt door

temperatuurschommelingen, worden gecompenseerd door de basis/emitter-spanning van de transistor T4.



Het basisschema van een temperatuur gecompenseerde referentiediode.
(© 2017 Jos Verstraten)

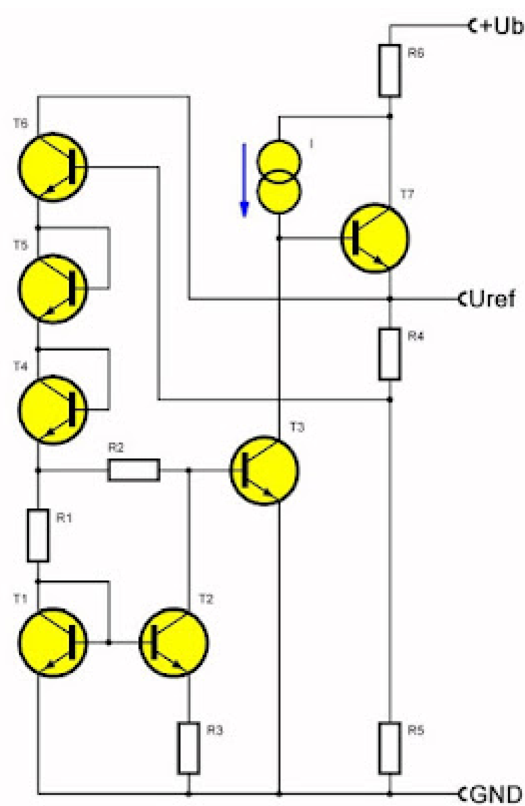
De bandgap referentie
Het basisschema van een bandgap referentie is getekend in onderstaande figuur. Men gaat weer uit van de basis/emitter-overgang van een silicium transistor, die nu echter in voorwaartse richting wordt gepolariseerd. De geleidingsspanning van een dergelijke junctie is ongeveer 0,65 V. Belangrijk is dat wiskundig aangetoond kan worden dat een dergelijke junctie een zeer lineaire temperatuurscoëfficiënt heeft van -2 mV/°C. Bij het bandgap principe wordt deze negatieve temperatuurscoëfficiënt gecompenseerd door een tweede temperatuurgevoelig element in serie te schakelen, dat een even grote, maar positieve temperatuurscoëfficiënt heeft. Het resultaat is dat de totale temperatuurscoëfficiënt nul is en dat de schakeling een temperatuur-onafhankelijke spanning genereert.
De uitgangsspanning van de schakeling is gelijk aan de basis/emitter-spanning van de transistor T3 plus de spanningsval over de weerstand R2. Men kan nu wiskundig aantonen dat deze spanningsval wordt bepaald door de logaritmische verhouding tussen de stromen I_1 en I_2 en door een factor die afhankelijk is van de temperatuur. De eerste bepalende factor van de uitgangsspanning, de basis/emitter-spanning van T3, heeft zoals bekend een negatieve temperatuurscoëfficiënt van -2 mV/°C. Het komt er nu dus op neer de spanningsval over R2 een temperatuurscoëfficiënt te geven van +2 mV/°C. Dat kan heel gemakkelijk, want het volstaat de verhouding tussen de stromen I_1 en I_2 een bepaalde wiskundig te berekenen waarde te geven. Deze verhouding moet zo berekend worden dat de logaritmische verhouding tussen beide stromen de noodzakelijke waarde krijgt om de gewenste temperatuurscoëfficiënt tot gevolg te hebben.
In de praktijk kunt u deze waarde instellen door het lasertrimmen van de waarde van de weerstanden R1 en R2. Hoe nauwkeuriger beide weerstanden worden afgeregeld, hoe preciezer beide temperatuurscoëfficiënten in absolute waarde aan elkaar gelijk worden en hoe stabieler de uitgangsspanning van de schakeling is!



Het basisschema van een bandgap referentie. (© 2017 Jos Verstraten)

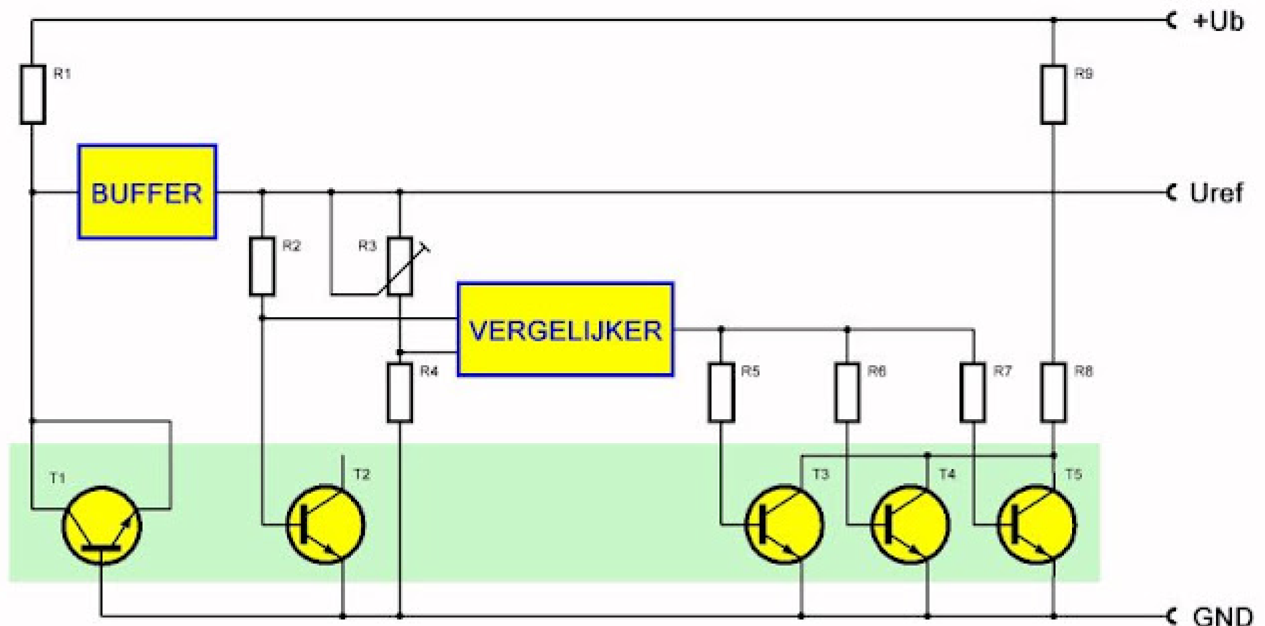
Het bandgap principe wordt vaak in de praktijk toegepast. Nadeel is echter dat de uitgangsspanning van een bandgap referentie zeer laag is, namelijk ongeveer 1,25 V. Wilt u uit deze lage spanning praktisch bruikbare waarden afleiden, dan moet u de bandgap referentie afsluiten met een versterkertje. Het probleem is dan dat de temperatuurscoëfficiënt op de versterking van deze extra trap de basisnauwkeurigheid van de referentie kan beïnvloeden.

Bandgap referenties met hogere uitgangsspanningen
Sommige fabrikanten zijn er in geslaagd de eigen uitgangsspanning van het bandgap principe op te voeren tot ongeveer 2,5 V. Men werkt dan met het basisschema dat in onderstaande figuur wordt voorgesteld. De uitgangsspanning van de referentie wordt nu verhoogd door een aantal als diode geschakelde transistoren in serie te schakelen. De uitgangsspanning van deze schakeling is gelijk aan de som van de basis/emitter-spanningen van de transistoren T4, T5 en T6, plus de extra component over R1, die weer zorgt voor het minimaliseren van de totale temperatuurscoëfficiënt.



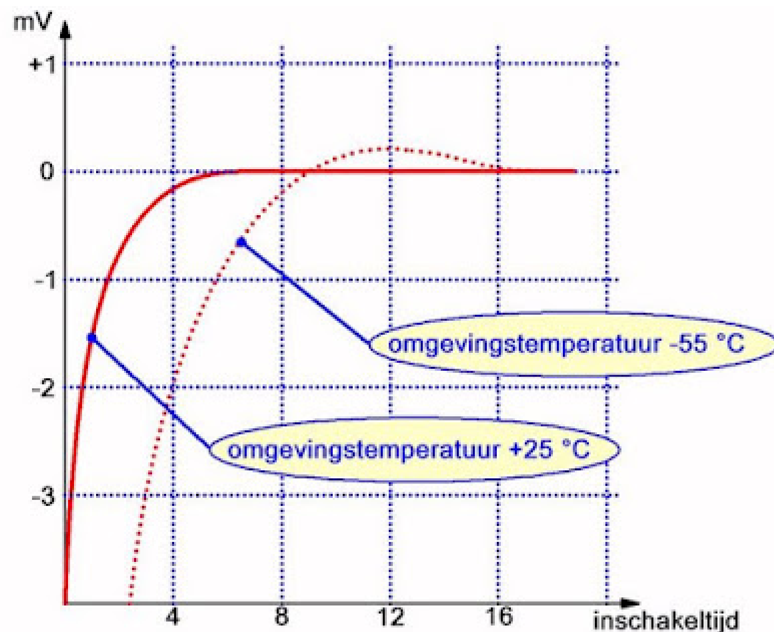
Het basisschema van een bandgap referentie met verhoogde uitgangsspanning. (© 2017 Jos Verstraten)

De thermostatisch geregelde spanningsreferentie
Bij dit soort schakelingen wordt de chip in het IC ingesteld op een constante temperatuur van ongeveer 90 °C. Temperatuurschommelingen, veroorzaakt door de omgeving, worden door een thermostatische regeling gecompenseerd. De referentiediode staat zodoende op een constante temperatuur en levert een constante spanning af.
Het principeschema van een thermostatisch geregelde referentie is geschetst in onderstaande figuur. De basis/emitter-spanning van transistor T2 wordt, met zijn lineaire temperatuurscoëfficiënt van -2 mV/°C, gebruikt als temperatuursensor. Deze spanning wordt in een comparator vergeleken met een referentiespanning. Omdat ook deze zeer stabiel moet zijn wordt deze spanning afgeleid uit de uitgangsspanning van het IC. De comparator stuurt stroom door de transistoren T3, T4 en T5 die als verwarmingselement worden gebruikt. Transistor T1 is geschakeld als zenerdiode, want de basis/emitter-junctie is immers invers gepolariseerd. De doorslagspanning van deze junctie wordt als uitgangsspanning van de schakeling gebruikt.
Het zal duidelijk zijn dat de thermostatisch geregelde referenties uitstekende eigenschappen hebben. Dergelijke schakelingen hebben een temperatuurscoëfficiënt van rond de 0,3 ppm/°C, hetgeen wil zeggen dat de uitgangsspanning 0,3 miljoensten delen afwijkt per graad Celsius!



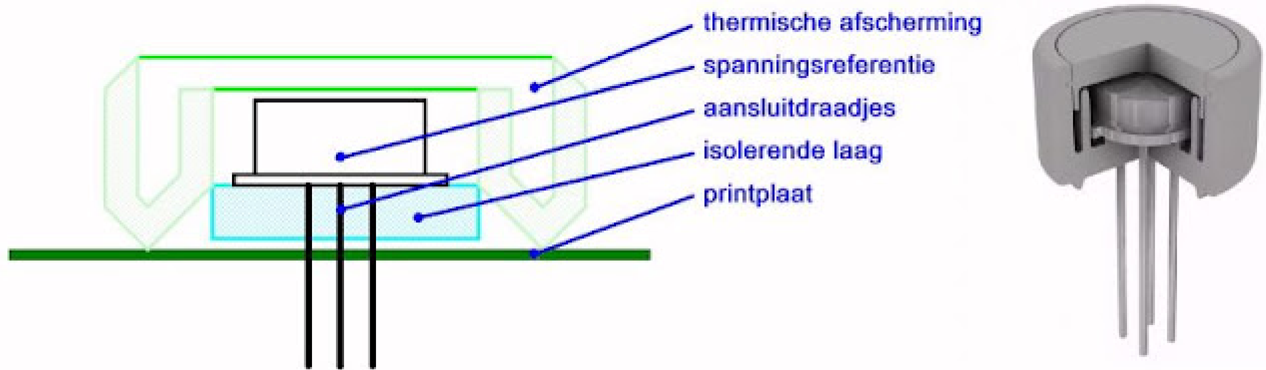
Het basisschema van een thermostatisch geregelde referentie. (© 2017 Jos Verstraten)

U moet echter in de praktijk rekening houden met opwarmingsverschijnselen bij het inschakelen van de voedingsspanning. De chip moet immers eerst op de werktemperatuur komen alvorens het IC een betrouwbare spanning genereert. Dat opwarmen gaat echter vrij snel. Bij een omgevingstemperatuur van 25 °C heeft de chip zich binnen de vijf seconden ingesteld op de werktemperatuur en levert het IC een stabiele en betrouwbare referentiespanning af.



De inregeltijd van een typische thermostatisch geregelde spanningsreferentie. (© 2017 Jos Verstraten)

De thermostatisch geregelde spanningsreferenties nemen tamelijk veel stroom op van de voeding. Er moet immers vermogen in de chip gepompt worden om deze op een constante en vrij hoge temperatuur te houden. Is dit bezwaarlijk, bijvoorbeeld bij batterij-gevoede apparatuur, dan kunt u de referentie inpakken in een 'thermische afscherming'. Deze zorgt ervoor dat de chip haar thermische energie veel minder gemakkelijk kan overdragen aan de omgevingslucht. Er is bijgevolg veel minder vermogen nodig om de constante chiptemperatuur te handhaven.



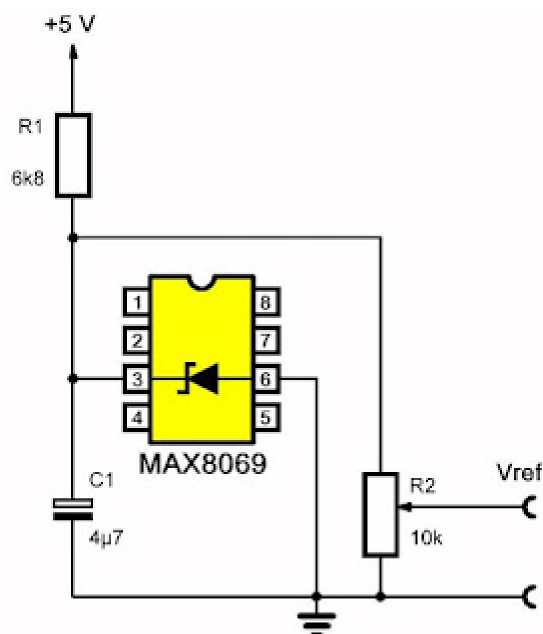
Een 'thermische afscherming' verkleint het energieverbruik van een thermostatisch geregelde referentie aanzienlijk. (© 2017 Jos Verstraten)

Besluit
Hoewel het lijkt alsof de thermostatisch geregelde spanningsreferenties de beste papieren hebben, mag u toch niet uit het oog verliezen dat diverse fabrikanten er in geslaagd zijn met name bandgap referenties te ontwikkelen die wat stabiliteit betreft de eigenschappen van de thermostaten vrij dicht benaderen. Met uiteraard als extra voordeel het veel kleiner vermogen dat bandgap referenties nodig hebben om goed te kunnen werken.

Gebruik in de praktijk

Het is onbegonnen werk om de vele bestaande spanningsreferenties stuk voor stuk te beschrijven. U kunt echter deze IC's in een aantal categorieën indelen, die we nu even in het kort bespreken.

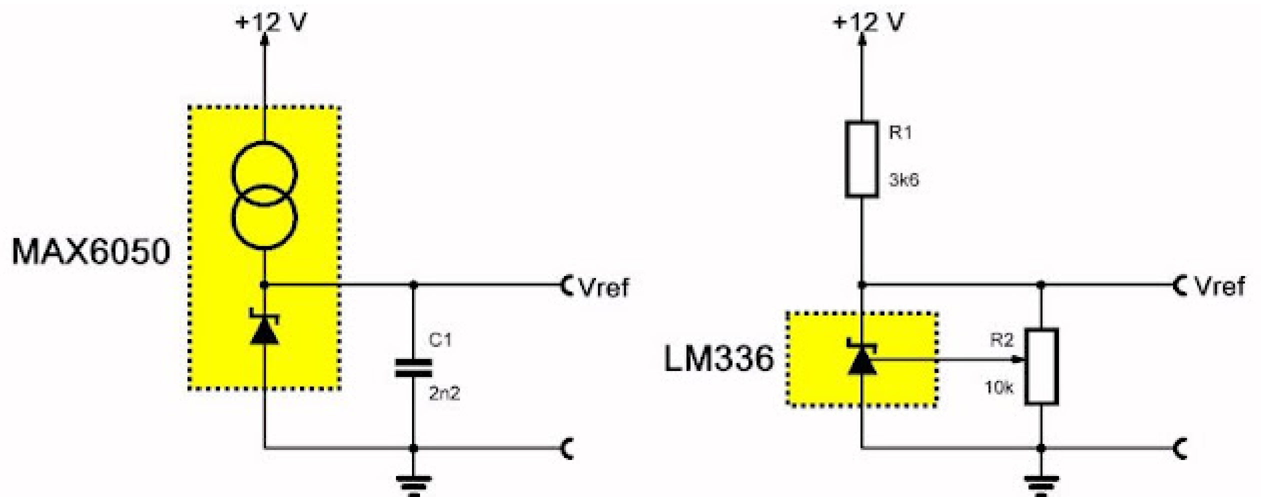
De tweepootjes
Dat zijn spanningsreferenties die u in de praktijk behandelt als normale zenerdioden. Dus, in serie met een weerstand over de voedingsspanning aansluiten, de referentiespanning op het knooppunt van beide onderdelen aftakken. Het basisschema van een dergelijke referentie, de MAX8069, is getekend in onderstaande figuur.



Het toepassen van spanningsreferenties met twee aansluitingen. (© 2017 Jos Verstraten)

De driepootjes
Driepootjes moet u rechtstreeks tussen de voedingsspanning en de massa aansluiten en

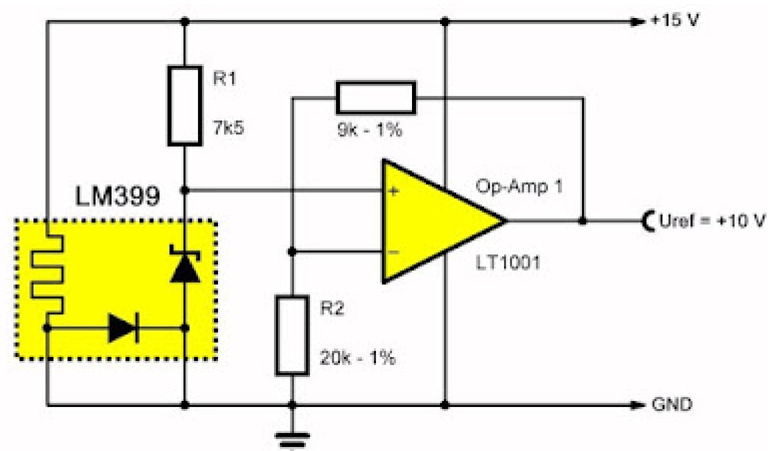
bieden op een derde pen hun referentiespanning aan. Een typische vertegenwoordiger van deze klasse is getekend in onderstaande figuur links. Daarnaast zijn er driepootjes die in serie met een weerstand tussen de massa en de voeding zijn geschakeld, maar die een derde ingang hebben waarmee u de uitgangsspanning binnen bepaalde grenzen kunt instellen. Een typische representant van deze categorie is de LM336, zie rechter schema.



Twee typische vertegenwoordigers van de driepootjes. (© 2017 Jos Verstraten)

De vierpootjes

De thermostatisch geregelde vierpootjes moet u aansluiten zoals voorgesteld in onderstaande figuur. In dit voorbeeld wordt een LM399 toegepast als gebufferende +10,0 V referentie.



Toepassingsvoorbeeld van een thermostatisch geregelde spanningsreferentie. (© 2017 Jos Verstraten)